

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Электротехнологии и электротехники

кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись Тимофеев В. Н.
инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Индукционный МГД-насос для жидкого магния
тема

13.04.02 :Электроэнергетика и электротехника
код и наименование направления

13.04.02.07 Электротехнологии в металлургии
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____ Дата, подпись	_____ к.т.н, доцент Должность, ученая степень	_____ Тимофеев С. П. инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____ Дата, подпись	_____ д.т.н, доцент, профессор Должность, ученая степень	_____ Первухин М. В. инициалы, фамилия
Выпускник	_____ Дата, подпись		_____ Кижаев И. В. инициалы, фамилия

Красноярск 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Обзор публикаций по МГД-насосам	5
1.1 Принцип действия и конструкция МГД-насосов	7
1.2 Классификация МГД-насосов.....	8
1.2.1 Индукционные МГД-насосы	8
1.2.2 Кондукционные МГД-насосы.....	15
2 Математическое моделирование физических процессов в МГД-насосах	20
2.1 Выбор методов и постановка задачи.....	20
2.2 Математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов	23
2.2.1 Постановка задачи	24
2.2.2 Электромагнитный расчет модели симметричного двухстороннего МГД-насоса.....	26
2.2.3 Результаты численного моделирования	29
2.2.4 Результаты расчета гидродинамической задачи.....	31
2.3 Расчет электромагнитных характеристик по инженерной методике	32
2.4 Результаты расчета	42
2.5 Расчет тепловых характеристик системы канал-индуктор МГД-насоса ..	43
3 Рекомендации для проектирования опытно-промышленного образца	45
3.1 Режимы работы	45
3.2 Конструкция МГД-насоса	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47
ПРИЛОЖЕНИЕ А	49
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к магнию и сплавам на его основе обусловлен, с одной стороны, сочетанием важных для практического использования свойств, а с другой стороны, большими сырьевыми ресурсами магния. Велика сфера использования магния и магниевых сплавов со специальными химическими свойствами, например в источниках тока и для протекторов при защите стальных сооружений от коррозии.

Конструкционные магниевые сплавы – это лишь одна, причём не самая большая по объёму область применения магния. Магний широко используется как химический реагент во многих металлургических процессах. В частности, он применяется в чёрной металлургии для обработки чугуна с целью десульфурации. В общем в последние годы имеется тенденция к расширению применения магния в качестве химического реагента. Значительное количество магния используется для получения титана, и надо искать пути повышения эффективности применения его в этих целях. Проявляется также значительный интерес к магнию и сплавам на его основе как аккумуляторам водорода.

Многие специалисты утверждают, что дальнейшее развитие ядерной энергетики немыслимо без перехода к строительству и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах. Они позволяют более эффективно использовать запасы урана, решать задачи охраны окружающей среды. Наконец, они еще более безопасны, чем строящиеся сейчас ядерные энергоблоки.

Для АЭС с реакторами мощностью 1000-2000 МВт необходимы насосы расходом 15-20 тыс. м³/ч и выше. Механические насосы становятся при этом весьма сложными сооружениями. С увеличением расхода увеличиваются габариты и масса насоса. А больше масса и длина выемной части насоса усложняют проблемы снижения вибрации и обеспечения герметичности, затрудняют монтаж и демонтаж насоса, требуют увеличения габаритных размеров здания и грузоподъемности кранов.

В связи с этим проявляется значительный интерес к использованию в основных контурах АЭС с реакторами на быстрых нейтронах МГД-насосов, которые удовлетворяют указанным выше требованиям.

Преимуществами таких насосов являются возможность полной герметизации конструкции без каких-либо систем уплотнения, отсутствие вращающихся частей и легкость регулирования расхода, удобство и простота обслуживания, отсутствие ограничений по местоположению в рабочем контуре.

МГД-устройства позволяют осуществить электромагнитное перемешивание, транспортировку и дозирование расплавов, сократить время приготовления сплавов и повысить качество продукции плавильно-литейных производств. В МГД-насосах происходит перемещение жидкого металла за счет электродинамических сил, вызванных взаимодействием токов индуктора и металла в канале.

Целью данной работы является проведение расчета МГД-насоса для перекачивания магния на основе технического задания. Дополнительной задачей в ходе работы является выполнение сборочного чертежа.

Расчет будет выполняться с помощью математического моделирования, подкрепленного расчетом по инженерной методике. Работа включает в себя электромагнитный расчет с последующим гидродинамическим моделированием процессов, происходящих в канале с перекачиваемым металлом. Вспомогательным является тепловой расчет системы индуктор-канал с металлом в результате которого, необходимо получить температуру обмоток и расплава на выходе.

1 Обзор публикаций по МГД-насосам

Магнитогидродинамический насос (МГД-насос), предназначен для перемещения электропроводящих жидкостей (напр., жидких металлов) под воздействием магнитного поля.

Под магнитогидродинамическими устройствами с жидкометаллическим рабочим телом обычно понимаются устройства, в которых на движущийся по проточным трактам жидкий металл воздействует магнитное поле. Основным назначением МГД-устройств, как правило, является обеспечение перемещения и управление потоками жидких металлов (МГД-насосы и дроссели) или измерение величин этих потоков (расходомеры). В ядерной энергетике МГД-устройства нашли широкое применение в связи с развитием реакторов на быстрых нейтронах. Более высокая плотность энерговыделения в этих реакторах, необходимость применения теплоносителей с низкими замедляющими свойствами определили выбор в качестве теплоносителя таких реакторов жидкие металлы. МГД-насосы нашли успешное применение во вспомогательных системах реакторных установок на быстрых нейтронах БОР-60, БН-350, БН-600 и в основных контурах реактора БР-10.

Основными преимуществами МГД-насосов перед механическими насосами являются: полная герметичность проточного тракта, надежность и практическое отсутствие необходимости обслуживания, простота и удобство регулирования подачи (расхода жидкого металла), отсутствие ограничений по месту расположения в контуре. В настоящее время закончено изготовление МГД-насосов для реакторной установки БН-800, ведется разработка для БН-1200.

Наиболее широко в ядерных установках используются МГД-машины индукционного типа. Индукционные насосы не требуют больших токов и могут работать при промышленной частоте тока. Они используются для перекачки жидкого натрия в атомных установках, атомных энергетических установках подводных лодок, военных кораблей, крупнотоннажных судов и т.д. Как и

кондукционные насосы они могут работать при высоких температурах (до 1000°C), при высокой производительности. Электромагнитные насосы могут успешно применяться в качестве дозаторов и клапанов в литейном деле, в атомной энергетике и химической промышленности.

Бесконтактное воздействие на металл и легкость управления и автоматизации делают их применение очень перспективным делом. Индукционные насосы применяются и для пайки печатных плат волной жидкого припоя (олова) над поверхностью ванны с припоем.

В ядерной энергетике большое применение получили цилиндрические МГД-машины с внутренним ферромагнитным сердечником. Однако особенности расчета цилиндрических МГД-машин связаны с наличием нескольких характерных признаков, отличающих эти машины от плоских линейных. Прежде всего, линии тока во вторичной среде таких машин при однородном по азимуту профиле скорости среды есть замкнутые окружности, поэтому в цилиндрическом канале отсутствует поперечный краевой эффект. Далее, в таких машинах используется одностороннее возбуждение – обмотка располагается с одной, как правило, наружной, стороны канала. Индукция магнитного поля в цилиндрической машине уменьшается сильнее по высоте зазора, чем в плоской, при одинаковых немагнитных зазорах.

Одностороннее возбуждение приводит также к тому, что линейная токовая нагрузка в цилиндрической машине примерно в 2 раза меньше, чем в плоской. В результате при одинаковых немагнитных зазорах в цилиндрической машине в 2 раза меньше индукция и примерно в 4 раза меньше давление, развиваемое на единицу длины, при прочих равных условиях.

1.1 Принцип действия и конструкция МГД-насосов

Принцип действия большинства МГД-устройств основан на использовании электромагнитных сил. Эта сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Направление электромагнитной силы определяется правилом левой руки. Область МГД-устройства, в которой возбуждаются электромагнитные силы, называется рабочей или активной зоной.

Электрический ток может подводиться к жидкому металлу извне кондукционным (контактным) способом или возбуждаться в металле индукционным (бесконтактным) способом с помощью переменного электромагнитного поля. Отсюда МГД-устройства можно разделить на два класса - кондукционные и индукционные.

В МГД-насосах, предназначенных для перекачивания жидкого металла из одной емкости в другую, электромагнитные силы в рабочей зоне создают электромагнитное давление. Такие МГД-устройства называются напорными. Обычно в насосах длина рабочей зоны намного меньше длины канала, по которому транспортируется жидкий металл. МГД-насосы, как и обычные электрические машины, являются обратимыми и могут работать в режимах двигателя (насоса), генератора и тормоза. В режиме насоса электромагнитное давление или разность давлений по концам рабочей зоны, преодолевая гидравлическое сопротивление металлотракта приводит металл в движение. В этом случае подводимая к рабочей зоне электромагнитная энергия преобразуется в механическую энергию движущегося жидкого металла. Производительность насоса определяется расходом жидкого металла в единицу времени Q , который равен произведению сечения канала на среднюю скорость металла в этом сечении.

Если жидкий металл в канале приводить в движение силами неэлектрического происхождения, например, силами тяжести, то возможны генераторный и тормозной режимы работы МГД-насоса. В первом случае

электромагнитная система рабочей зоны выдает электрическую энергию. Во втором случае электромагнитная система формирует в рабочей зоне электромагнитные силы, направленные против движения металла. В рабочей зоне создается противодействие, препятствующее или полностью прекращающее движение жидкого металла в канале. В таком режиме работает МГД-насос-дозатор, осуществляющий автоматическое регулирование скоростью подачи расплава из раздаточного миксера. Когда уровень расплава в миксере большой, то МГД-устройство работает в режиме тормоза. Когда уровень расплава в миксере становится мал и силы тяжести не в состоянии обеспечивать расход расплава в желобах, необходимый для работы литейной машины с заданной производительностью, МГД-устройство работает в режиме насоса.

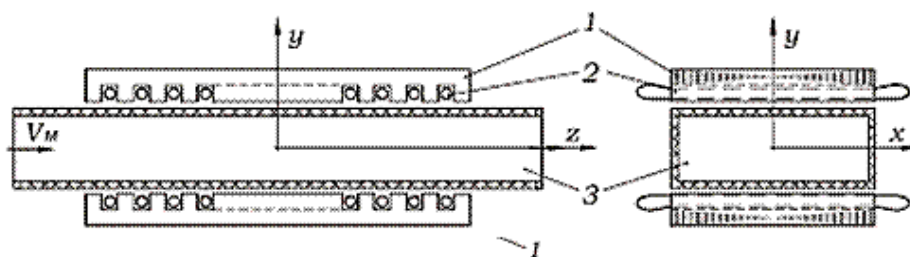
1.2 Классификация МГД-насосов

1.2.1 Индукционные МГД-насосы

Принцип действия индукционных МГД-насосов аналогичен асинхронным электрическим машинам. В этих устройствах электрические токи в рабочей зоне канала индуктируются бегущим магнитным полем, электрическая связь между расплавом и внешней электрической цепью отсутствуют и стенки каналов могут быть неэлектропроводящими.

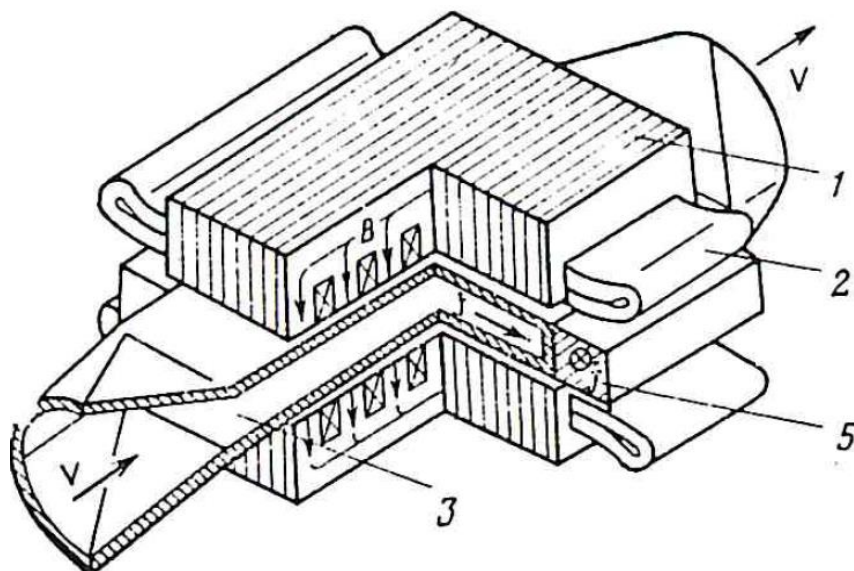
Плоские индукторы могут иметь два ферромагнитных сердечника, расположенных по обе стороны прямоугольного канала, или один сердечник, расположенный с одной стороны канала. В пазах сердечников расположена трехфазная или двухфазная обмотка, аналогичная обмоткам нормальных асинхронных машин. Многофазная обмотка, питаемая сдвинутыми по фазе токами, и создает бегущее магнитное поле. Такие индукторы являются неподвижными относительно рабочей зоны канала. Бегущее магнитное поле

можно также получить движущимися вблизи рабочей зоны постоянными магнитами.



1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал с металлом

Рисунок 1 – Эскиз плоского двустороннего линейного насоса



1 – индуктор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник; 5 – короткозамыкающая шина

Рисунок 2 – Схема конструкции плоского линейного индукционного насоса

Обычно выполняется с двусторонним расположением индукторов относительно плоского слоя жидкого металла (Рисунок 2), заключенного в канале огнеупорной трубы. Для уменьшения расстояния между индукторами («воздушного» зазора), от которого сильно зависят электрические показатели индуктора, труба имеет сплюсненную форму, с каналом сильно вытянутого

сечения. Металл, заполняющий канал, представляет собой жидкую проводящую полосу, находящуюся в бегущем магнитном поле.

Ограниченная ширина этой полосы приводит к тому, что в работе плоского линейного индукционного насоса весьма важную роль играет поперечный краевой эффект, сущность которого будет пояснена ниже.

С возникновением атомной энергетики весьма актуальной стала задача перекачивания жидкометаллических теплоносителей. Индукционные насосы оказались удобным средством решения этой задачи и получили широкое распространение.

Канал индукционных насосов энергетического назначения обычно выполняется из тонколистовой (0,5 - 1 мм) хромоникелевой стали, например 1Х18Н9Т, являющейся немагнитной и обладающей высоким удельным сопротивлением.

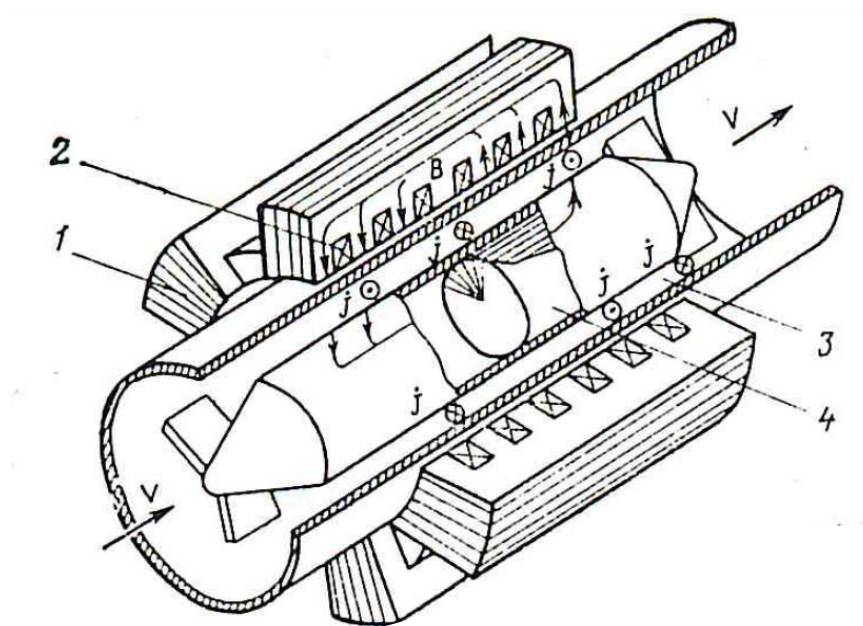
Магнитные стали непригодны для изготовления канала (для рабочих температур ниже точки Кюри), так как при этом значительная часть магнитного потока индуктора могла бы замыкаться по стенке канала, не заходя в жидкий металл. Высокое удельное сопротивление хромоникелевой стали уменьшает потерю электроэнергии на вихревые токи, индуцированные в стенках канала. Кроме того, хромоникелевые аустенитные стали обладают повышенными механическими свойствами при высоких температурах и окалиностойкостью.

Для уменьшения поперечного краевого эффекта канал делают достаточно широким (отношение сторон сечения канала 1:20 и более). По краям канала часто помещают короткозамыкающие шины. Для предотвращения «раздувания» плоского канала силами внутреннего давления в стенки канала варивают продольные внутренние ребра, разделяющие его на ряд параллельных каналов меньшей ширины.

Возможность применения металла в качестве материала стенок канала обусловлена малой агрессивностью щелочных металлов по отношению к конструкционным металлам и малым контактным сопротивлением току на переходах жидкий металл - шина и жидкий металл - ребро - жидкий металл.

Между каналом и магнитопроводом помещается слой тепло-изоляционного материала, уменьшающий тепловые потери жидкого металла и нагрев магнитопровода.

Магнитопровод набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5 мм, в которых штамповкой или фрезерованием (в собранном пакете) делаются пазы для обмотки. Для уменьшения потерь на вихревые токи в магнитопроводе отдельные его листы изолируют друг от друга, чаще всего слоем изоляционного лака.



1 – индуктор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник

Рисунок 3 - Схема конструкции цилиндрического линейного индукционного насоса

Цилиндрический линейный индукционный насос отличается тем, что в нем жидкий металл находится в поле индуктора в виде цилиндрического слоя с кольцевым поперечным сечением. Такая форма слоя получается при использовании в качестве канала для жидкого металла кольцевого пространства между двумя концентрическими трубами.

Бегущее магнитное поле создается системой кольцевых катушек, надетых на наружную трубу и поочередно (по длине насоса) присоединенных к различным фазам трехфазной сети. Магнитное поле должно пронизывать кольцевой зазор, занятый жидким металлом, в радиальном направлении. Для этого внутри внутренней трубы обычно помещается железный сердечник, а вдоль наружной трубы укладываются шихтованные магнитопроводы с пазами, в которые входят катушки обмотки. В поперечном сечении магнитная система цилиндрического линейного индукционного насоса имеет вид многолучевой звезды.

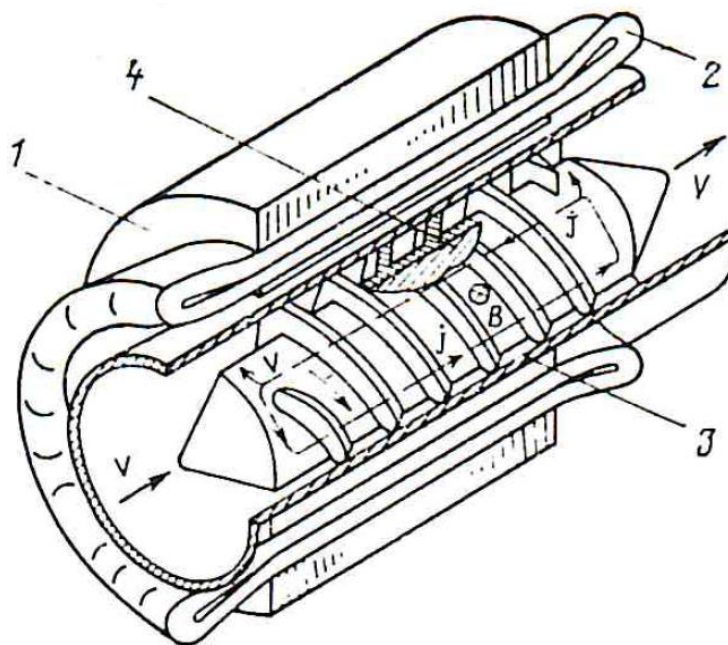
В цилиндрическом линейном индукционном насосе отсутствуют как неактивные участки в контурах индукционных токов в жидком металле, так и лобовые части обмоток. Поэтому цилиндрические линейные индукционные насосы имеют лучшие энергетические показатели, что связано, однако, со значительным усложнением конструкции.

Конструктивным и технологическим преимуществом цилиндрического линейного индукционного насоса является то, что в нем огнеупорная труба имеет круглое сечение. В случае металлических труб это позволяет допускать значительно большие давления, чем в плоских трубах. Один из насосов такого типа запроектирован автором на внутреннее давление 75 атм. Круглые керамические трубы можно изготавливать большей длины, чем плоские, без соединений внутри насоса, так как заготовки круглых труб меньше коробятся при обжиге.

В цилиндрическом насосе для перекачивания жидких металлов с температурой выше точки Кюри для железа ($\sim 760^{\circ}\text{C}$) необходимо охлаждать внутренний сердечник, что связано со значительными конструктивными трудностями. Это существенно ограничивает перспективы применения цилиндрических линейных насосов в металлургическом и литейном производстве.

В некоторых случаях преимущества, связанные с круглым сечением огнеупорной трубы, имеют настолько большое значение, что оправдывают

применение цилиндрического линейного индукционного насоса даже когда по условиям охлаждения приходится отказаться от внутреннего магнитного сердечника. Это, разумеется, сильно ухудшает эффективность насоса, так как для создания магнитного поля с той же величиной индукции требуется значительно больше ампервитков, а следовательно, мощность индуктора должна быть больше даже по сравнению с насосом плоского линейного типа.



1 – индуктор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – винтовой сердечник

Рисунок 4 - Схема конструкции винтового линейного индукционного насоса

МГД-машины с винтовыми каналами имеют обмотку по типу статора асинхронной машины, создающую вращающееся магнитное поле, и канал, обеспечивающий винтообразное движение жидкого металла. Замкнутость магнитной системы с обмоткой исключает продольный концевой эффект, связанный с их разомкнутостью в линейных системах. Влияние входа металла в магнитное поле и выхода из него на интегральные характеристики невелико в связи с малым отношением ширины элементарного канала к длине взаимодействия $2p_n t_n$, где p — число элементарных каналов. Это обстоятельство существенно упрощает расчет винтовых МГД-машин.

1.2.2 Кондукционные МГД-насосы

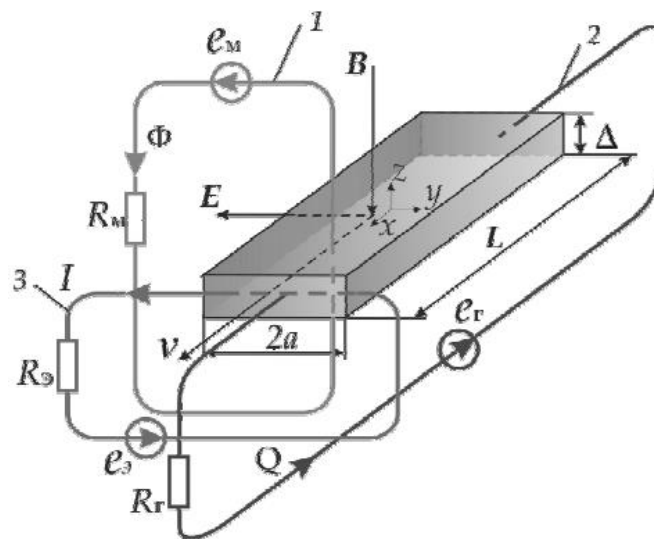
Разновидность магнитогидродинамических насосов, которые подают жидкость в результате воздействия на неё электромагнитной силы, возникающей за счёт взаимодействия магнитного поля, создаваемого магнитной системой насоса, с электрическим током, проходящим через находящуюся в нём жидкость. Кондукционные насосы работают на постоянном и переменном токе. Направление движения жидкости в канале насоса определяется правилом Лево́й руки.

В кондукционных МГД-насосах рабочая зона является местом пересечения независимых электрической и магнитной цепей. Поэтому в рабочей зоне таких устройств можно получить относительно большие значения плотности тока J и магнитной индукции B . Кондукционные МГД-насосы могут работать как на постоянных, так и переменных электрическом токе и магнитном поле. В любом случае магнитное поле «неподвижно» относительно стенок канала.

Основным недостатком таких устройств можно считать ограниченность их применения, так как с их помощью можно лишь регулировать поток жидкого металла.

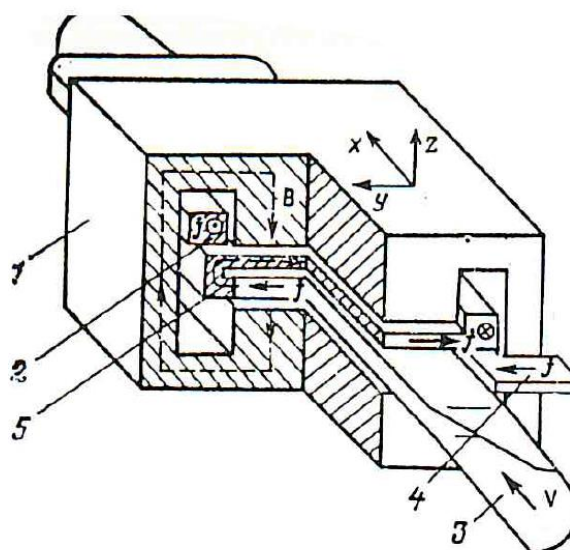
В кондукционных насосах пондеромоторные силы, обуславливающие движение жидкости, возникают вследствие взаимодействия магнитного поля и токов, подведенных к жидкости кондуктивным способом.

Известны винтовые электромагнитные насосы, содержащие многофазный индуктор, включающий внутренний магнитопровод, выбранный на трубу из листов электротехнической стали, и сквозной винтовой канал с коаксиально расположенными наружной и внутренней стенками.



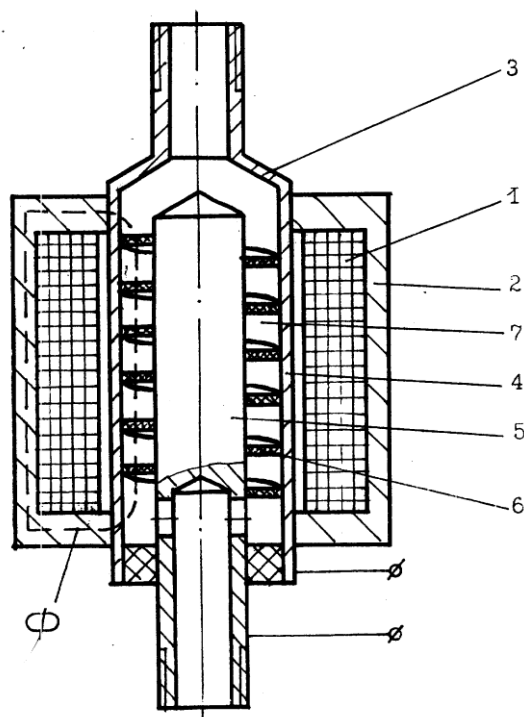
1 – магнитная цепь; 2 – гидравлическая цепь; 3 – электрическая цепь

Рисунок 5 – МГД-канал



1 – магнитопровод; 2 – обмотка возбуждения; 3 – канал; 4 – токоподводящие электроды; 5 – компенсационная шина

Рисунок 6 – Схема конструкции плоского кондукционного насоса



1 – магнитная система; 2 – ферромагнитный экран; 3 – сквозной канал; 4, 5 – коаксиальные стенки; 6 – винтовая перегородка

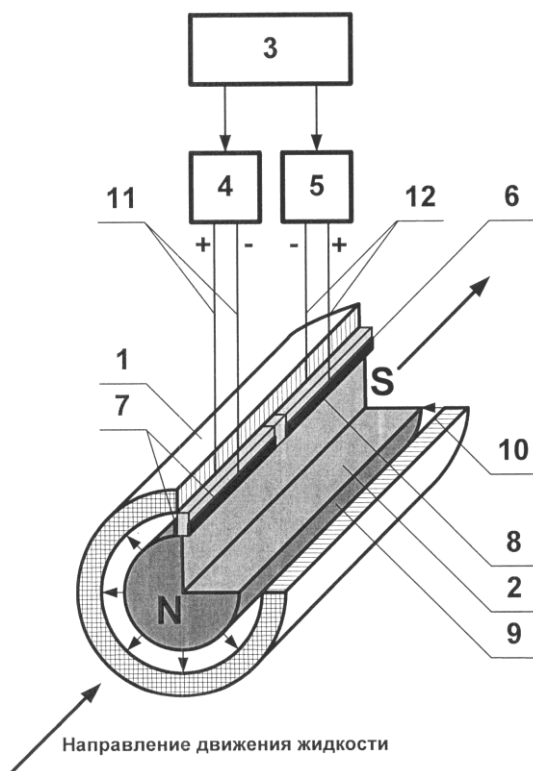
Рисунок 8 – Схема конструкции винтового кондукционного насоса

На рисунке 8 схематично изображен заявляемый винтовой электромагнитный насос.

Насос содержит явнополюсную магнитную систему в виде соленоида 1 с ферромагнитным экраном 2 и сквозной канал 3, имеющий наружную стенку 4, коаксиально ей расположенную внутреннюю стенку 5 и промежуточную винтовую перегородку 6, образующие винтовой канал 7, по которому проходит рабочая среда. Наружная 4 и внутренняя 5 стенки выполнены в виде электродов, т.е. к ним приложено напряжение, а винтовая перегородка выполнена электроизоляционной и является изолятором между стенками 4 и 5.

Насос работает следующим образом. При подаче напряжения на наружную стенку 4 относительно внутренней 5, в рабочей жидкости, протекающей по винтовому каналу 7 возникает ток, направление которого перпендикулярно силовым линиям магнитного потока Φ , создаваемого соленоидом 1. В результате взаимодействия тока с магнитным полем

возникающая электромагнитная сила согласно правилу левой руки перемещает жидкость по винтовому каналу 7. Так как результирующая сил, действующих на жидкость, достаточно близко совпадает с направлением винтового канала, то эти силы будут суммироваться, создавая напор в канале. Одновременно протекающий в стенках канала ток нагревает проходящую по винтовому каналу жидкость.



1 – обечайка; 2 – цилиндрический сердечник; 3 – задающий блок; 4 – первый регулируемый источник постоянного напряжения; 5 – второй регулируемый источник постоянного напряжения; 6 – плоская изолирующая пластина; 7 – первая пара плоских электродов; 8 – вторая пара плоских электродов

Рисунок 9 – Схема конструкции цилиндрического линейного кондукционного насоса

Недостаток указанного устройства заключается в повышенных энергозатратах, обусловленных применением обмотки возбуждения для создания магнитного потока, и низкой эффективности вследствие

невозможности обеспечить равномерное распределение магнитного потока в цилиндрическом канале с электропроводной жидкостью.

Наиболее близким к заявляемому является «Цилиндрический индукционный насос» (Авторское свидетельство СССР №175824, F05G, 1964 г.), принятый за прототип, содержащий кольцевой канал, образованный обечайкой и внутренним цилиндрическим сердечником.

Недостатком данного технического решения являются высокие энергозатраты на возбуждение магнитного потока в кольцевом канале, а также сложность обеспечения регулирования расхода перекачиваемой электропроводной жидкости.

Технический результат предлагаемого устройства заключается в снижении энергозатрат и упрощении процесса регулирования расхода перекачиваемой электропроводной жидкости.

Питание кондукционных насосов постоянного тока может осуществляться от униполярных генераторов постоянного тока, так как сами насосы являются по своей сути униполярными электрическими машинами. Униполярные генераторы должны обеспечивать токи до 105 А при напряжении 0,5-3,0 В (конечно, для питания могут быть использованы и выпрямительные установки или химические элементы).

Технический результат достигается тем, что цилиндрический линейный кондукционный насос содержит обечайку и внутренний цилиндрический сердечник, образующие кольцевой канал, плоскую пластину, выполненную из изоляционного материала, размещенную в кольцевом канале и герметично прикрепленную к цилиндрическому сердечнику, выполненному из намагниченного в осевом направлении высококоэрцитивного постоянного магнита, по его образующей и к обечайке, выполненной из ферромагнитного материала, причем цилиндрический сердечник и внутренняя поверхность обечайки имеют химически инертную термостойкую изолирующую оболочку.

2 Математическое моделирование физических процессов в МГД-насосах

2.1 Выбор методов и постановка задачи

Несмотря на все достоинства кондукционных машин и индукционных цилиндрических машин, которые были представлены выше, от них придется отказаться, ввиду сложности конструкции, неблагоприятными условиями охлаждения индуктора и неудобством монтажа и замены огнеупорной трубки.

Осталось выбрать определенный тип индуктора. Из плоских линейных индукционных насосов можно выделить насос с трубчатой обмоткой и насос с проволочной обмоткой. Принципиальные различия их в том, что насос с трубчатой обмоткой используется для перекачки высокотемпературных сплавов, а насос с проволочной обмоткой для низкотемпературных сплавов.

Задачей является спроектировать МГД-насос для перекачки магния и его сплавов, т. к. магний является высокотемпературным сплавом, значит выбираем индуктор с трубчатой обмоткой.

В индукционных насосах, проектируемых для металлов, имеющих сравнительно высокую температуру, особенно при невысоких требуемых давлениях, целесообразно применять индукторы с обмоткой из прямоугольной шины. Отвод тепла от обмотки при этом осуществляется воздушным или косвенным водяным охлаждением.

Желательно рассчитывать машину на частоту сети 50 Гц, т. к. это скажется на подключении насоса к сети. Ведь легче и дешевле изготовить трансформатор, нежели преобразователь частоты.

С целью дальнейшей детализации задачи и построении расчетной модели проведем анализ распределения магнитного поля в зазоре и плотности тока в жидком металле насоса. На рисунке 10 представлены характеры распределения магнитного поля в зазоре (а) и токов в жидком металле (б). В плоскости xoz магнитная индукция в зазоре имеет две составляющие

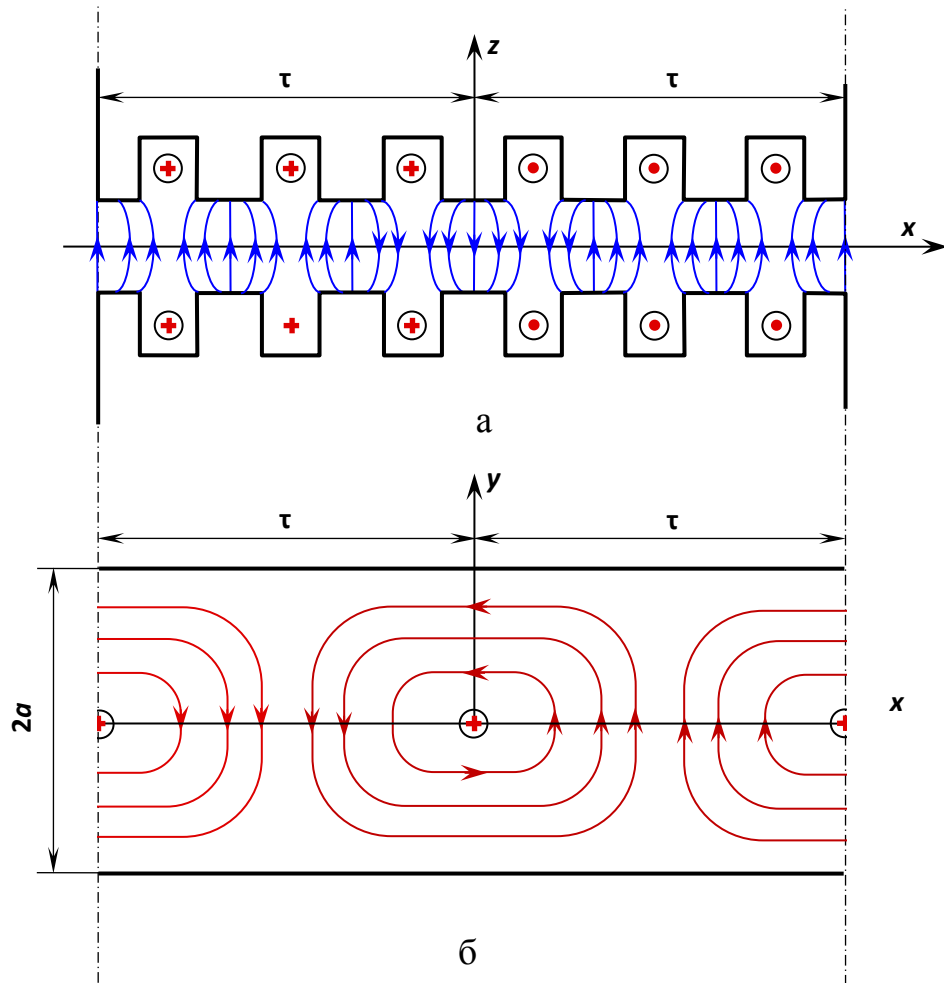


Рисунок 10 – Картины распределения магнитного поля (а) и токов в жидком металле (б)

$$\mathbf{B} = e_x B_x + e_z B_z. \quad (1)$$

В плоскости xoy плотность тока в жидком металле также имеет две составляющие

$$\boldsymbol{\delta} = e_x \delta_x + e_y \delta_y. \quad (2)$$

Взаимодействие бегущего магнитного поля с токами в жидком металле создаёт электромагнитную силу, приводящую жидкий металл в движение по оси металлотракта. Величина и направление электромагнитной силы определяется векторным произведением плотности тока и магнитной индукции

$$\overline{f} = \overline{\delta} \times \overline{B}. \quad (3)$$

Очевидно, что составляющая силы по оси x, будет равна

$$f_x = \delta_y \cdot B_z. \quad (4)$$

Направление силы определяется правилом левой руки. Если магнитное поле и электрические токи изменяются во времени по гармоническому закону, например

$$\delta_y = \delta_{ym} \sin(\omega t), \quad (5)$$

$$B_z = B_{zm} \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

то амплитудное значение f пульсирует с двойной частотой

$$f_m = \delta_{ym} B_{zm} \cos \varphi - \delta_{ym} \cdot B_{zm} \cos(2\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Первый член определяет постоянную по времени составляющую электромагнитной силы, которая создает гидравлический напор и обеспечивает транспортирование металла, второй – знакопеременную составляющую, вызывающую в металле колебания удвоенной частоты.

При анализе установившихся электромагнитных процессов удобно использовать комплексную запись гармонически изменяющихся величин. Так

для плотности тока и магнитной индукции их комплексные действующие величины будут иметь вид

$$\dot{\delta}_y = \frac{\delta_{ym}}{\sqrt{2}} e^{j0^0}, \quad (7)$$

$$\dot{B}_z = \frac{B_{zm}}{\sqrt{2}} e^{j\varphi}. \quad (8)$$

В этом случае усредненное во времени значение электромагнитной силы

$$f_x = \operatorname{Re} \left\{ \dot{\delta}_y^* B_z \right\}, \quad (9)$$

где символ Re означает реальную часть произведения комплексных чисел, \dot{B}_z^* — комплексно-сопряженная с \dot{B}_z величина.

2.2 Математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов

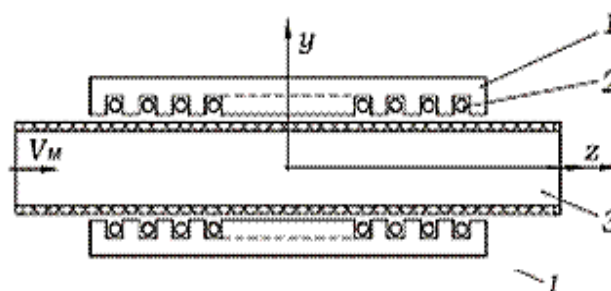
Компьютерные модели стали обычным инструментом математического моделирования и применяются в физике, астрофизике, механике, химии, биологии, экономике, социологии, метеорологии, других науках и прикладных задачах в различных областях радиоэлектроники, машиностроения, автомобилестроения и проч. Компьютерные модели используются для получения новых знаний о моделируемом объекте или для приближенной оценки поведения систем, слишком сложных для аналитического исследования.

ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, предназначенная для автоматизированных инженерных расчётов и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики

конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать в силу их возможности проводить вычислительные эксперименты, в тех случаях когда реальные эксперименты затруднены из-за финансовых или физических препятствий или могут дать непредсказуемый результат. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет определить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта-оригинала (или целого класса объектов).

2.2.1 Постановка задачи



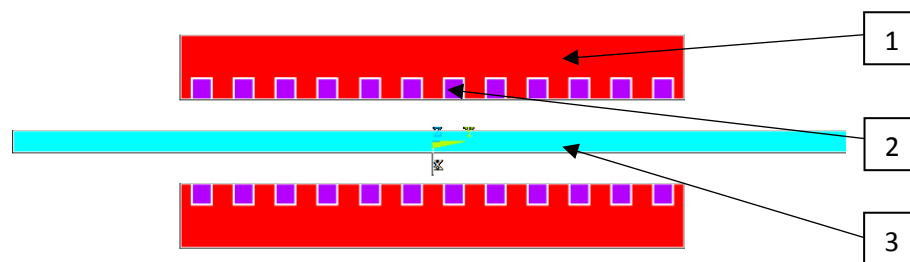
1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал с металлом

Рисунок 11 – Эскиз плоского двустороннего линейного насоса

Модель представляет собой симметричную модель, состоящую из двух параллельных частей. Расчет будет проводиться со следующими допущениями:

- Задача является плоско-симметричной, поэтому производим расчет только для одной из сторон системы индуктор-канал с металлом;
- Пренебрегаем концевым эффектом и лобовыми частями обмоток;
- Расчет производится в двухмерной постановке.

После применения всех вышеперечисленных допущений в итоге получаем следующую модель:



1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – канал с металлом

Рисунок 12 – Эскиз плоского индукционного МГД-насоса

Насос предназначен для транспортировки жидкого металла, находящегося в плоском прямоугольном канале 3. Транспортирование осуществляется под воздействием бегущего магнитного поля, которое индуцирует в жидком металле токи, и в результате взаимодействия этих токов с магнитным полем возникают электромагнитные силы, действующие на частицы жидкого металла. В рабочей зоне канала развивается напор, и металл приходит в движение.

Источником бегущего магнитного поля является индуктор, который состоит из двух ферромагнитных сердечников 1, собранных из листов электротехнической стали, и многофазной обмотки 2, расположенных в пазах сердечников.

Вследствие конечных размеров распределение электромагнитного поля (ЭМП) в МГД-насосе насосе неравномерное. Неравномерность распределения ЭМП по оси z принято называть толщиной краевым эффектом, а по оси y – поперечным краевым эффектом. Неравномерность ЭМП по длине канала (оси x) называется продольным краевым эффектом.

С уменьшением зазора Δ_{ind} между сердечниками индукторов эффективность насоса возрастает. Поэтому сечение канала стараются «сплющить», то есть уменьшить толщину жидкого металла Δ_{me} . При выбранной величине Δ_{me} , величина зазора Δ_{ind} определяется толщинами металлоконструкции и теплоизоляции канала.

2.2.2 Электромагнитный расчет модели симметричного двухстороннего МГД-насоса

Как известно из электротехники электромагнитные процессы описываются уравнениями Максвелла, которые в комплексной форме имеют вид

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\delta}, \quad (10)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -j\omega\bar{B}, \quad (11)$$

$$\bar{\delta} = \gamma(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}), \quad (12)$$

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H}, \quad (13)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = \operatorname{div} \bar{H} = 0, \quad (14)$$

$$\operatorname{div} \bar{\delta} = 0, \quad (15)$$

где H – напряженность магнитного поля, δ – плотность тока, E – напряженность электрического поля, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, B – магнитная индукция, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

Здесь (10) и (11) представляют собой первое и второе уравнения Максвелла. В правой части первого уравнения учтена только плотность тока проводимости. Током смещения пренебрегаем. Как следует из (12) плотность тока имеет две составляющие.

Одна составляющая ($\gamma\bar{E}$) обусловлена электродвижущей силой трансформации, а другая ($\bar{v} \times \bar{B}$) электродвижущей силой движения. Уравнения (14) и (15) подчеркивают неразрывность линий магнитной индукции и плотности тока.

В качестве искомой функции, характеризующей электромагнитное поле, выберем напряженность электрического поля \vec{E} , Будем считать, что в нашей модели

$$\vec{E} = \bar{e}_x \dot{E}_x + \bar{e}_y \dot{E}_y. \quad (16)$$

Решив уравнения (10) и (11) относительно \dot{E}_y , получим дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_y}{\partial x^2} - j\mu_0 \gamma \omega \dot{E}_y - \mu_0 \gamma v \frac{\partial^2 \dot{E}_y}{\partial x} = 0. \quad (17)$$

Уравнение (17) имеет бесконечное количество решений, поэтому для получения единственного решения необходимо записать граничные условия.

На поверхностях $z = +\delta/2$ и $z = -\delta/2$ справедливы условия

$$\dot{H}_x|_{z=+\delta/2} = -\dot{J}, \quad (18)$$

$$H_x|_{z=+\delta/2} = \dot{J}. \quad (19)$$

Выражения (18) и (19) получаются из условия выполнения закона полного тока на поверхностях верхнего и нижнего магнитопроводов.

Из уравнения (11), имеем

$$-j\omega\mu_0 \vec{H} = \text{rot } \vec{E} = \begin{vmatrix} \bar{e}_x & \bar{e}_y & \bar{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \dot{E}_x & \dot{E}_y & \dot{E}_z \end{vmatrix} = \bar{e}_x \left(\frac{\partial \dot{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} \right) + \bar{e}_z \left(\frac{\partial \dot{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} \right). \quad (20)$$

Отсюда получим

$$\dot{H}_x = \frac{1}{j \omega \mu_0} \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z}, \quad (21)$$

$$\dot{H}_z = \frac{1}{j \omega \mu_0} \left(\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} - \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial x} \right). \quad (22)$$

С учетом (21) граничные условия (18) и (19) можно записать в виде

$$\left. \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} \right|_{z=\frac{\delta}{2}} = -j \omega \mu_0 \dot{J}, \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial E_y}{\partial z} \right|_{z=-\frac{\delta}{2}} = j \omega \mu_0 \dot{J}. \quad (24)$$

На поверхностях $y=0$ и $y=a$ из физических соображений принимаем условия

$$\dot{E}_y|_{y=0} = 0 \text{ и } \dot{E}_y|_{y=a} = 0. \quad (25)$$

2.2.3 Результаты численного моделирования

После построения геометрии решаемой модели, необходимо разбить ее на элементы. Для более точных результатов, грамотное построение сетки является наиболее приоритетной задачей. Но при сильно мелком разбиении срок расчета может затянуться. Чтобы добиться точных результатов и ускорить расчет

воспользуемся уплотнением сетки в канале, магнитопроводе и обмотке. В среде сетку задаем более крупной.

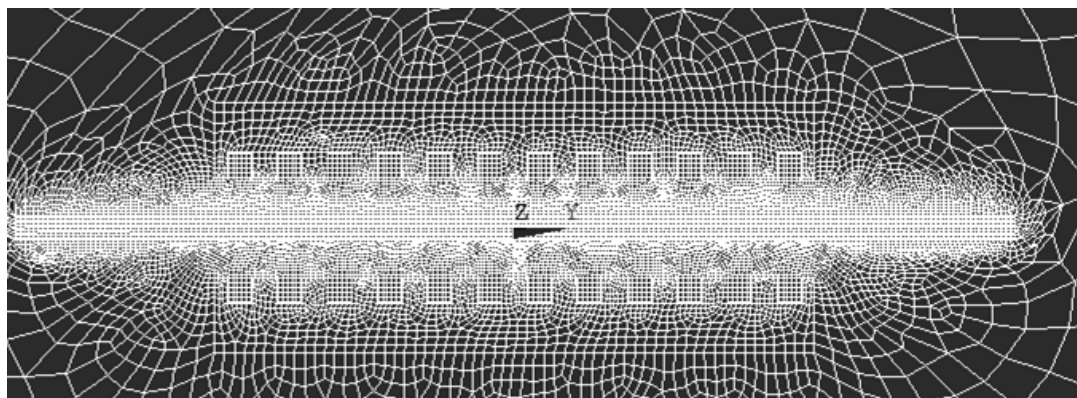


Рисунок 13 – Сетка конечных элементов

В ходе математического моделирования численным методом были получены следующие изображения, на которых расположена визуализация магнитных процессов.

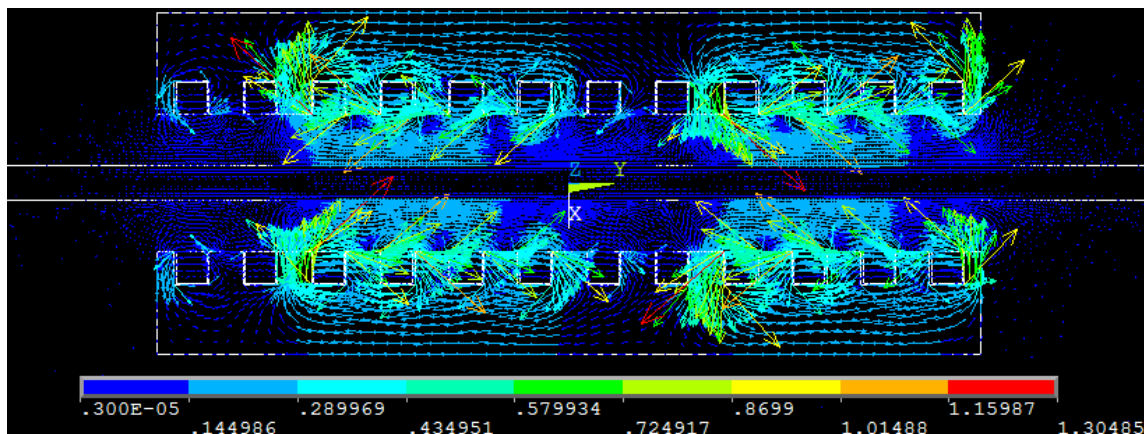


Рисунок 14 – Векторное распределение магнитной индукции в системе индуктор-канал с металлом

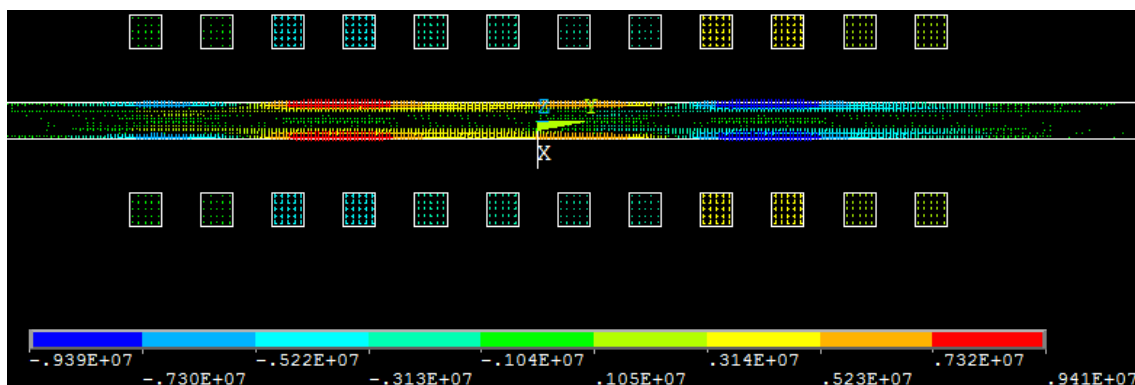


Рисунок 15 – Векторное распределение плотности тока

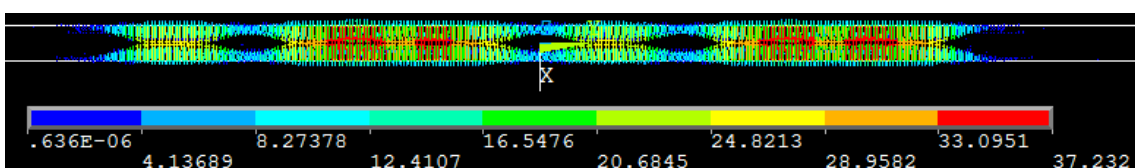


Рисунок 16 – Векторное распределение электромагнитных сил в канале

2.2.4 Результаты расчета гидродинамической задачи

Искомými значениями в гидродинамике являются пространственное распределение векторного поля скорости в канале. Программный пакет ANSYS CFX позволяет на основе электромагнитной задачи получить результаты моделирования.

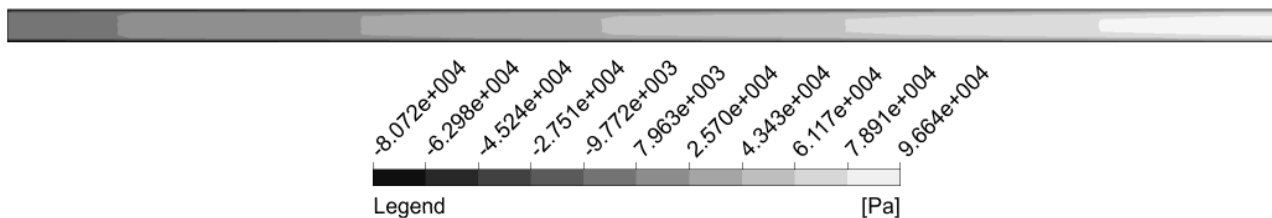


Рисунок 17 – Распределения давления теплоносителя в канале

Толщина футеровки и теплоизоляции канала на сторону равна 1 см; частота питающего тока 50 Гц.

Параметры, принятые на основании предварительных расчетов: ширина канала трубы $c_2 = 30$ см; высота канала трубы $\Delta = 5$ см; воздушный зазор индуктора $\Delta_{ind} = 10$ см.

Скорость движения бегущего магнитного поля

$$v_c = 2 \cdot \tau \cdot f = 2 \cdot 40 \cdot 50 = 4000 \text{ см/сек.} \quad (26)$$

Скорость движения жидкого металла

$$v_m = \frac{N \cdot 10^6}{3600 \cdot \sigma \cdot c_2 \cdot \Delta} = \frac{4,5 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1,7 \cdot 10 \cdot 0,07} = 1000,458 \text{ см/сек.} \quad (27)$$

Величина скольжения

$$S = \frac{v_c - v_m}{v_c} = \frac{4000 - 2,458}{4000} = 0,9. \quad (28)$$

Расчетная длина индуктора

$$l = 2p\tau = 2 \cdot 6 \cdot 20 = 250 \text{ см.} \quad (29)$$

Коэффициент, определяющий влияние индуктивности вторичного контура

$$\varepsilon = \frac{8f \cdot S \cdot \Delta \cdot \tau^2 \cdot 10^{-9}}{\rho \cdot \delta} = \frac{8 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 1,5 \cdot 40^2 \cdot 10^{-9}}{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 45,686. \quad (30)$$

Коэффициенты K_a и K_p , учитывающие ослабление давления от поперечного краевого эффекта и реакции вторичной цепи (жидкого металла) при $c/\tau = 0,375$ и $c/\delta = 15$ будут равны $K_a = 0,4$ и $K_p = 0,25$.

Коэффициент, учитывающий рассеяние рабочего магнитного потока

$$K_n = ch\left(\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau}\right) = ch(0,039) = 1,001 . \quad (31)$$

Необходимая индукция магнитного поля в жидком металле

$$B = \sqrt{\frac{9,81 \cdot D \cdot \rho \cdot 10^{14}}{\tau \cdot l \cdot f \cdot S \cdot K_a \cdot K_{np}}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 0,71 \cdot 2,1 \cdot 10^9}{40 \cdot 80 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 0,4 \cdot 0,9}} = \quad (32)$$

$$= 2504,075 \text{ Гс} = 0,256 \text{ Тл} ,$$

где K_{np} – эмпирический коэффициент, учитывающий уменьшение давления вследствие некомпенсированной части продольного краевого эффекта.

Индукция на активной поверхности железа индуктора

$$B_0 = K_n \cdot B = 1,001 \cdot 2504,075 = 2506,581 \text{ Гс} = 0,251 \text{ Тл} . \quad (33)$$

Магнитный поток через полюс

$$\Phi_0 = \frac{4 \cdot B_0 \cdot \tau \cdot c}{\pi} = \frac{4 \cdot 2506,581 \cdot 40 \cdot 15}{3,14} = 24065400 \text{ Мкс} = 0,024 \text{ Вб} . \quad (34)$$

Число последовательных витков на фазу обмотки (без учета корректирующих катушек), принимая

$$\omega = \frac{380 \cdot 10^8}{4,44 \cdot K_e \cdot K_{o\phi} \cdot f \cdot \Phi_0} = \frac{220 \cdot 10^8}{10,62 \cdot 0,958 \cdot 50 \cdot 385400} = 80 . \quad (35)$$

Обмоточный коэффициент

$$K_{o\phi} = \frac{\sin 30^\circ}{q \cdot (\sin \frac{30^\circ}{q})} = \frac{\sin 30^\circ}{4 \cdot (\sin \frac{30^\circ}{4})} = 0,958 . \quad (36)$$

Магнитодвижущая сила на один полюс

$$F = K_\delta' \cdot K_\delta'' \cdot K_\delta''' \cdot \delta \cdot B = 1,082 \cdot 1 \cdot 1,001 \cdot 1 \cdot 504,075 = 2400 , \quad (37)$$

$$K_\delta' = \frac{t_z}{t_z - \theta \cdot \frac{\delta}{2}} = \frac{3,3}{3,3 - 0,169 \cdot \frac{1}{2}} = 1,082 , \quad (38)$$

$$K_\delta'' = \frac{\sinh(\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau})}{\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau}} = \frac{\sinh(\frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 40})}{\frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 40}} = 1 , \quad (39)$$

$$K_\delta''' = \frac{1}{1 - 0,048 \cdot \frac{\delta}{2c}} = \frac{1}{1 - 0,048 \cdot \frac{1}{30}} = 1,002 , \quad (40)$$

$$\theta = \frac{(\frac{2 \cdot b_z}{\delta})}{5 + \frac{2 \cdot b_z}{\delta}} = \frac{(\frac{2 \cdot 1,764}{1})}{1 + \frac{2 \cdot 1,764}{1}} = 0,503 . \quad (41)$$

Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F}{1,35 \cdot \omega \cdot K_{об}} = \frac{1 \cdot 437}{1,35 \cdot 140 \cdot 0,958} = 1088 \text{ A} . \quad (42)$$

Число проводников в пазу

$$S_n = \frac{a \cdot \omega}{2 \cdot p \cdot q} = \frac{4 \cdot 80}{2 \cdot 2 \cdot 4} = 20 . \quad (43)$$

Назначаем размеры паза и сечения проводника.

Зубцовый шаг магнитопровода

$$t_z = \frac{\tau}{3 \cdot q} = \frac{40}{3 \cdot 4} = 10 \text{ см} . \quad (44)$$

Ширина зубца

$$b_z = 10 \text{ см} . \quad (45)$$

Ширина паза

$$b_n = 10 \text{ см} . \quad (46)$$

Ширина паза

$$h_n = 10 \text{ см} . \quad (47)$$

Проводник – медный провод марки ПОЖ-700 ПСТД, ТУ 16.К71-129-91 круглого сечения по меди 0,3 мм с изоляцией толщиной 0,04 мм.

В паз укладывается 20 проводников.

Индукция в зубцах

$$B_z = B_0 \cdot \frac{t_z}{b_z} = 504 \cdot \frac{3,3}{0,8} = 6900 \text{ Гс} = 0,69 \text{ Тл} . \quad (48)$$

Активное сопротивление фазы обмотки с учетом корректирующих катушек

$$\begin{aligned} r &= 2 \cdot \rho_{np} \cdot \frac{\left(\omega + \frac{2 \cdot q \cdot S_n}{a} \right)}{a \cdot S_{np}} \cdot (c2 + K_\phi \cdot \tau) = \\ &= 2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\left(140 + \frac{2 \cdot 4 \cdot 69,741}{4} \right) \cdot (30 + 2 \cdot 40)}{4 \cdot 4,65 \cdot 10^{-2}} = \\ &= 0,878 \text{ Ом} , \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \rho_{np} &= 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 + 0,004(t_{np} - 20) \right) = \\ &= 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 + 0,004(150 - 20) \right) = 1,79 \cdot 10^{-6} , \end{aligned} \quad (50)$$

где $t_{np}=150^\circ\text{C}$ – рабочая температура обмотки, в градусах Цельсия. Ввиду малой высоты проводника в пазу коэффициент K_a для проволочной обмотки не учитываем.

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_l = \frac{A \cdot q \cdot \tau \cdot (K_\phi - 0,64)}{c} = \frac{0,165 \cdot 4 \cdot 40 \cdot (2 - 0,64)}{15} = 0,308 . \quad (51)$$

Коэффициент проводимости рассеяния по коронкам зубцов

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= \left(\frac{1}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \left(\ln \left(\frac{\delta^2}{(4 \cdot b_n)^2} + \frac{1}{4} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2 \cdot \delta}{b_n} \right) th \left(\frac{b_n}{\delta} \right) \right) = \\ &= \left(\frac{1}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \left(\ln \left(\frac{1^2}{(4 \cdot 2,533)^2} + \frac{1}{4} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2 \cdot 1}{2,533} \right) th \left(\frac{2,533}{1} \right) \right) = 0,064 .\end{aligned}\tag{52}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния на фазу

$$\begin{aligned}x_\delta &= 0,158 \cdot \left(\frac{f}{100}\right) \cdot \left(\frac{\omega}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta}{p \cdot q}\right) \cdot (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_3) = \\ &= 0,158 \cdot \left(\frac{50}{100}\right) \cdot \left(\frac{140}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 1}{4 \cdot 4}\right) \cdot 2,562 = 0,04 \text{ Ом} .\end{aligned}\tag{53}$$

Индуктивное сопротивление рабочего потока на фазу

$$x_{0\mu} = \frac{U}{K_e \cdot I_\mu} = \frac{380}{1,92 \cdot 2,423} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} .\tag{54}$$

Суммарное индуктивное сопротивление

$$x = x_\delta + x_{0\mu} = 2,952 + 47,162 = 4,2 \text{ Ом} .\tag{55}$$

Полное сопротивление фазы обмотки

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{0,878^2 + 50,114^2} = 50,122 \text{ Ом} .\tag{56}$$

Проверка предварительно выбранного значения коэффициента K_e

$$K_e' = \left(\frac{z}{x_{0\mu}} \right) \cdot \left(\frac{10,3}{5,7} \right) = \left(\frac{50,122}{47,162} \right) \cdot \left(\frac{10,3}{5,7} \right) = 1,92, \quad (57)$$

Активная мощность вторичной цепи

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{4 \cdot \Delta \cdot c \cdot l \cdot S^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_a \cdot 10^{-16}}{\rho} = \\ &= \frac{4 \cdot 1800 \cdot 0,9^2 \cdot 50^2 \cdot 40^2 \cdot 504,075^2 \cdot 0,4}{2,1 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-16} = \\ &= 24190 \text{ Вт} . \end{aligned} \quad (58)$$

Реактивная мощность вторичной цепи

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4 \cdot \Delta \cdot c \cdot l \cdot S^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_p}{\rho \cdot 10^{16}} = \\ &= \frac{1800 \cdot 0,9^2 \cdot 50^2 \cdot 40^2 \cdot 504,075^2}{2,1 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-16} = 37040 \text{ ВАР} . \end{aligned} \quad (59)$$

Гидравлическая мощность

$$\begin{aligned} P_{гидр} &= \frac{4 \cdot \Delta \cdot c \cdot l \cdot S \cdot (1 - S) \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_a}{\rho \cdot 10^{16}} = \\ &= \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 15 \cdot 80 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0,9) \cdot 50^2 \cdot 40^2 \cdot 504,075^2 \cdot 0,4}{2,1 \cdot 10^{11}} = \\ &= 1890 \text{ Вт} . \end{aligned} \quad (60)$$

Приведенный активный ток вторичной цепи (ток потерь в жидком металле)

$$I_{2a}' = \frac{P_2 \cdot K_e}{3 \cdot U \cdot S} = \frac{24190 \cdot 1,925}{3 \cdot 380 \cdot 0,9} = 40,63 \text{ A} . \quad (61)$$

Приведенный реактивный ток вторичной цепи

$$I_{2p} = \frac{Q \cdot K_e}{3 \cdot U \cdot S} = \frac{3701 \cdot 1,925}{3 \cdot 380 \cdot 0,9} = 25,394 \text{ A} . \quad (62)$$

Фазный ток индуктора

$$I_1 = \sqrt{(I_\mu + I_{2p})^2 + I_{2a}'^2} = 7,4 \text{ A} . \quad (63)$$

Плотность тока в обмотке

$$j = \frac{I_1}{a \cdot S_{np}} = \frac{7,4}{0,064} = 115 \frac{\text{A}}{\text{см}^2} . \quad (64)$$

Потери в обмотке индуктора

$$P_1 = I_1^2 \cdot r = 110^2 \cdot 0,878 = 10110 \text{ Вт} . \quad (65)$$

Активная мощность индуктора

$$P = P_1 + P_2 = 10110 + 21490 = 31600 \text{ Вт} . \quad (66)$$

Кажущаяся мощность

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2} = \sqrt{37040^2 + 31600^2} = 37500 \text{ ВА} . \quad (67)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{31600}{51100} = 0,625 . \quad (68)$$

Гидравлический КПД

$$\gamma_{гидр} = \frac{P_{гидр}}{P} = \frac{1890}{31600} = 0,06 = 6\% . \quad (69)$$

Комплексный КПД

$$\eta = \frac{P_2 + P_{гидр}}{P} = \frac{21490 + 1890}{31600} = 0,74 = 74\% . \quad (70)$$

Примечание: приведенная методика расчета индукторов предназначена для приближенных расчетов. Более точные результаты могут быть получены с применением методики расчета индукторов с проволочной обмоткой, разработанной в Таллинском политехническом институте под руководством доц. Х. И. Янеса.

2.4 Результаты расчета

Таблица 1 – Сравнение полученных электромагнитных характеристик по разным методикам

Параметр	Инженерная методика	ANSYS MAPDL	Разница в результатах
Скорость движения жидкого металла, м/с	11	10,5	5 %
Коэффициент мощности	0,62	0,66	2,64 %
Полная мощность насоса, КВА	37,5	35,3	2,5 %

Таблица 2 – Сравнение полученных результатов с помощью моделирования гидродинамических процессов

Параметр	Техническое задание	ANSYS CFX	Разница в результатах
Давление номинальное, КПа	70	90	18 %
Производительность номинальная, Тн/ч	5	6,1	20 %

2.5 Расчет тепловых характеристик системы канал-индуктор МГД-насоса

Основные исходные данные:

Температура расплава – 700°C; температура окружающей среды – 20°C; коэффициент теплоотдачи стали – 500 Вт/м²°C; коэффициент теплоотдачи футеровки (Вата минеральная легкая) – 5,6 Вт/м²°C; коэффициент теплопроводности стали – 35 Вт/м²°C; коэффициент теплопроводности футеровки – 0,045 Вт/м²°C; толщина металла – 10 мм; Толщина футеровки – 10 мм.

Тепловой поток

$$Q = \frac{T_p - T_{окр}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{700 - 20}{\frac{1}{500} + \frac{0,01}{35} + \frac{0,01}{0,045} + \frac{1}{5,6}} = 2736 \frac{Вт}{м^2}. \quad (71)$$

Температура первого слоя

$$T_1 = T_p - Q \cdot \frac{1}{\alpha_1} = 700 - 2736 \cdot \frac{1}{500} = 695 \text{ } ^\circ C. \quad (72)$$

Температура второго слоя

$$T_2 = T_p - Q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right) = 700 - 2736 \cdot \left(\frac{1}{500} + \frac{0,01}{35} \right) = 694 \text{ } ^\circ C. \quad (73)$$

Температура третьего слоя

$$T_3 = T_p - Q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = \quad (74)$$

$$= 700 - 2736 \cdot \left(\frac{1}{500} + \frac{0,01}{35} + \frac{0,01}{0,045} \right) = 146 \text{ }^{\circ}\text{C} . \quad (75)$$

Мощность тепловых потерь

$$Q_{nom} = 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot Q = 2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 2736 = 2736 \text{ Вт} . \quad (76)$$

Температура расплава на выходе

$$T_{p.вых} = T_p + \frac{(Q_{эм} - Q_{nom})}{c_{св} \cdot Q \cdot \rho_{св}} = 700 + \frac{(5500 - 2736)}{130 \cdot 0,00011 \cdot 11,3} = \quad (77)$$

$$= 717^{\circ}\text{C} .$$

Первоначальный расчет проводился без учета охлаждения. И температура на поверхности футеровки была порядка 300°C. После добавления условий охлаждения, а именно воздушное с расходом 8,2 м³/с. Итоговая температура получилась приемлемой равной 146°C на поверхности футеровки.

3 Рекомендации для проектирования опытно-промышленного образца

МГД-насос должен отвечать следующим техническим характеристикам:

- схема включения обмоток – AAZZBBXXCCYY (верхний индуктор) и XXCCYYAAZZBB (нижний индуктор);
- поддержание плотности тока в обмотках на величину – 1000000 А/м^2 ;
- воздушное охлаждение обмоток с объемным расходом – $8,2 \text{ м}^3/\text{с}$;
- мощность источника питания не менее 40 КВА;
- симметричная установка индукторов в 100 мм от канала;
- использование плоского канала высотой 50 мм и шириной 300 мм из жаростойкой стали ГОСТ 5632-72;
- частота питающего напряжения 50 Гц.

3.1 Режимы работы

Единственным рабочим режимом является непрерывный (круглосуточный) режим работы. Для более продуктивной работы МГД-насоса необходимо осуществлять охлаждение обмоток. Обдувать необходимо воздушный промежуток между каналом и индуктором.

3.2 Конструкция МГД-насоса

Конструктивные особенности представлены в приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ конструкций МГД-насосов для перекачки жидких металлов. В результате сравнения различных типов индукционных насосов с точки зрения применимости для металлургических целей в большинстве случаев приходится отдать предпочтение индукционным насосам плоского линейного типа. Меньший коэффициент полезного действия их (по сравнению с цилиндрическими насосами с внутренним магнитным сердечником) полностью окупается простотой конструкции, благоприятными условиями охлаждения индуктора и удобством монтажа и замены огнеупорной трубки (в разъемных индукторах).

Выполнен расчет по инженерной методике. При его выполнении, подобрав определенные характеристики, удалось получить приемлемую мощность источника питания. Представлены рекомендации для проектирования опытно-промышленного образца МГД-насоса. Выполнен чертеж требуемого МГД-насоса.

Все результаты, полученные в ходе выполнения расчета и чертежа, соответствуют техническому заданию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гельгафт, Ю. М./ Лиелаусис, О. А./ Щербинин, Э. В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. Издательство «ЗИНАТНЕ». Рига 1976 г.
- 2 Тимофеев, В. Н./ Головенко, Е. А./ Кузнецова, Е. В. Применение МГД устройств в металлургии: Учебное пособие по самостоятельной работе. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007
- 3 Калнинь, Т. К. Явнополюсные МГД-насосы. Издательство «ЗИНАТНЕ». Рига 1969 г.
- 4 Андреев, А. М./ Глухих, В. А./ Иванов, В. В. Индукционные электромагнитные насосы для перекачивания жидко-металлических теплоносителей. Издательство «ЗИНАТНЕ». Рига 1975 г.
- 5 Андрианов, А. Н./ Витковский, И. В. Магнитогидродинамическая машина. Открытия. Изобретения. 1982 г. № 36.
- 6 Андреев, А. М./ Андрианов, А. Н./ Витковский, И. В. Магнитогидродинамический дроссель. Открытия. Изобретения. 1981 г. № 15.
- 7 Бирзвалк, Ю. А. Основы теории и расчета кондукционных МГД-насосов постоянного тока. Издательство «ЗИНАТНЕ». Рига 1968 г.
- 8 Баранов, Г. А./ Глухих, В. А./ Витковский, И. В. Исследования жидкометаллических МГД-генераторов. 6th Intern. Conf. On magnetohydrodynamic electrical power generation. Washington, D. C., 1975 г.
- 9 Баранов, Г. А./ Глухих, В. А./ Кириллов, И. Р. Расчеты и проектирование индукционных ИГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом. Издательство «Атомиздат». 1978 г.
- 10 Бинс, К./ Лауренсон, П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Издательство «Энергия». 1970 г.
- 11 Биргер, Б. Л./ Горовиц, В. С./ Гельфгат, Ю. М. МГД-дроссель. Открытия. Изобретения. 1977 г. № 20.

12 Тамоян, Г. С. Учебное пособие по курсу "Специальные электрические машины" кафедры Электромеханики, МЭИ (ТУ).

13 Бааке, Э./ Барглик, Д./ Лупи, С./ Киканоров, А./ Павлов, Е./ Павлов, С./ Первухин, М./ Тимофеев, В./ Тимофеев, С./ Хацаюк, М./ Якович, А. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. 2013.

14 Кашманов, И. А. Цилиндрический линейный кондукционный насос. RU 2526373. [<http://www.findpatent.ru/patent/252/2526373.html>]

15 Радкевич, Н. А. Винтовой электромагнитный насос. RU 2106735. [<http://www.findpatent.ru/patent/210/2106735.html>]

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИЛОЖЕНИЕ Б